

ミュオグラフィとアートをベースとした市民科学活動

角谷 賢二^{†a)} 中島裕司^{††} 林 武文^{†††} 田中 宏幸^{††††}

Citizen Science Activities based on Muography and Art

Kenji SUMIYA^{†a)}, Hiroshi NAKAJIMA^{††}, Takefumi HAYASHI^{†††} and Hiroyuki TANAKA^{††††}

Abstract Muography is used to image the internal structure of objects by detecting the passage of cosmic ray muons. Since around 2006, Hiroyuki Tanaka and his team have been investigating the interiors of volcanoes and the Earth's crust to determine their density and internal structure. Recently, applications have expanded to new fields such as positioning technology, time synchronization technology, and electronic communication technology. However, these scientific technologies are difficult to understand, making them inaccessible to the general public. Therefore, in 2017, we began the Muography Art Project, which aims to convey a correct understanding of muography, from its principles to its observation limits, to people other than experts through art. We hope that these activities will increase the general public's understanding of muography and serve as an opportunity for many talented young people to become interested in science and enter this field.

キーワード ミュオン ミュオグラフィアート 透視技術 測位技術 ナビゲーション技術 時刻同期技術 セキュリティー

1. まえがき

ミュオンは、銀河系における超新星爆発によって発生される宇宙線と、地球の大気が反応してできる素粒子の一つである。ミュオンは透過力が強く、巨大自然物体あるいはあらゆる人工構造物をほぼ真空中の光速度で貫通することができる。ミュオグラフィは、この宇宙線ミュオンの通過を検出することによって、物体の内部構造をイメージするために使用される。田中宏幸（共著者）は、2006年ごろから火山^{1~5)}、さらには台風⁶⁾などの内部を調べて、密度や内部構造を世界で初めて決定してきた。また、東京湾海底ミュオグラフィへ応用し、潮位をとらえた⁷⁾。最近では、ミュオンを用いて透視技術の分野だけでなく、測位技術⁸⁾からナビゲーション技術⁹⁾、時刻同期技術¹⁰⁾、電子通信技術¹¹⁾などの新たな領域にも応用を拡大させている。しかし、これらは難解な最先端科学技術¹²⁾であり、一般の人には近寄りづらい。

そこで、我々はアートを介してミュオグラフィの原理から観測限界までの正しい理解を専門家以外の一般人に伝えるというミュオグラフィアートプロジェクトの活動を2017年から始めた¹³⁾。これらの成果は、大阪、東京、岡山、埼玉などで展示会の開催と図録「ミ

ュオグラフィアート集」の発行により一般市民に公開した^{14~20)}。また、実証の場として併せて地域とともに巨大古墳の透視実験を行ってきた^{21~25)}。

我々のプロジェクトの推進により、芸術分野では国内外の芸術家の参加により、ミュオグラフィという最先端科学とアートの融合という新しい領域が創出された。また、古墳の計測を通じた地域連携活動により地域の歴史に対する関心を深めるとともに、宇宙や素粒子物理学に興味をもつ高校生の参加を実現し教育成果を挙げることができた。以上のように本プロジェクトにより、科学への啓発と教育、地域進捗に貢献することを検証した。

本稿ではミュオグラフィアートプロジェクトを通じた市民科学活動の実際とこれまでに得られた成果について総合報告する。

2. ミュオグラフィアートプロジェクトの推進体制

Fig. 1に示すように各組織や機関を総合して多角的にまた文理融合的にプロジェクト体制で推進した。このプロジェクトでは、基礎なるミュオグラフィ科学をベースとして、ミュオグラフィアートの推進、ミュオグラフィリベラルアーツの推進、ミュオグラフィの古墳への応用を市民と一緒に進めて行った。

アートへの展開には、専門分野の50名以上のアーティストが参加した。アーティストは、プロのアーティストから一般の市民、学生などである。その分野は、ミュオグラフィをモチーフとして絵画、書、工芸（京の鹿の子絞り、デリカビーズなど）、映像、デジタル画などに多岐にわたっている。さらに、大学では、学生とともにコンピュータグラフィックスによる可視化とARやVRなどのインタラクティブコンテンツの制作

[†] 国際美術研究所兼国際ミュオグラフィ研究所 大阪府
2-6-45-713 Unobe, Ibaraki, Osaka, 567-0042 Japan

^{††} 画家 大阪府

1-7-8 Daiho, Kananchō, Minamikawachi-gun, Osaka, 585-0005 Japan

^{†††} 関西大学総合情報学部 大阪府

Faculty of Informatics, Kansai University

2-1-1 Ryozenji Takatsuki, Osaka, 569-1095 Japan

^{††††} 東京大学国際ミュオグラフィ連携研究機構 東京都

International Muography Research Organization

1-1-1 Yayoi, Bunkyo, Tokyo, 113-0032 Japan

a) E-mail: sumiya@virtual-muography-institute.org

を推進した。

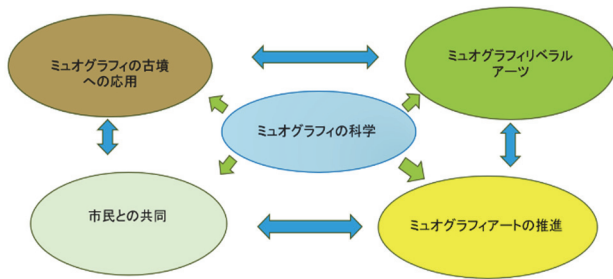


Fig.1 Promotion organization of Muography Art Project.

3. 科学をベースに芸術表現の創出

3-1 ミュオグラフィをテーマにした芸術表現

我々の活動は、ミュオグラフィの正しい理解を専門家以外の一般人に周知することが目的である。そこで、本章では、科学すなわちミュオグラフィの原理や実際の適用例を芸術（アート）で表現した結果を示す。

3-2 相対性理論とミュオン

ミュオンは、前述のように宇宙のかなたで超新星が爆発した時に発生した宇宙線が地球の大気圏に突入した時に発生する。そしてその寿命は 2μ 秒という極めて短いものである。この時間に光速度をかけても、わずか 660m 飛んだ後に消滅する計算となる。しかし、ミュオンは、強くローレンツブーストしており、局所的に時間が遅れる。Sara Steigerwaldは、Fig.2に示すようにそれをデジタル絵画で表現した²⁶⁾。これは、現実の世界と相対性理論の世界を砂時計で表現したもので、光のスピードでミュオンが降り注ぐと時間が遅れるため、寿命が 2μ 秒であっても地球に届くということを表現している。

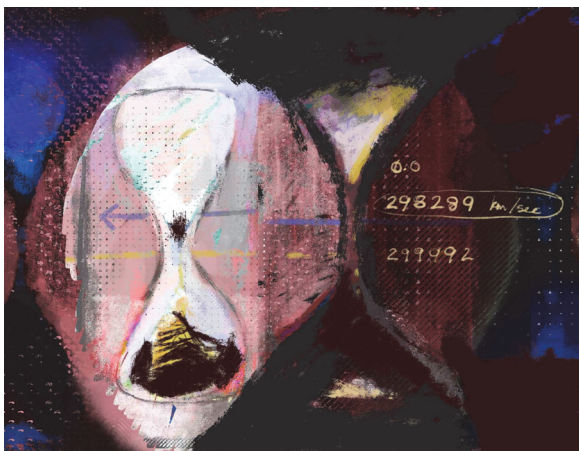


Fig.2 Digital image "Hourglass" prepared by Sara Steigerwald at 2017²⁶⁾.

3-3 ミュオンによるイメージング（巨大物体の透視）とアート

この技術は、X線によるレントゲン撮影と同じ原理で物体の透視を行うものである。レントゲン撮影とミュオグラフィとの違いは、対象となる物体の大きさの違いである。すなわちレントゲン撮影は、人間の大きさかそれより小さい物体の透視に使われるが、ミュオンによる透視は山、ピラミッド、古墳などの巨大物体の透視に用いられる。

火山のミュオグラフィは、2006年に浅間山の透視像が世界で初めて撮影された¹⁾。Fig.3-1にその実験結果を示す。このミュオグラフィ画像では、固結したマグマが映し出された。2021年に谷村暎子は、この浅間山の透視像をデリカビーズという技法で表現した¹⁷⁾。デリカビーズとは、小さなガラスビーズを糸に通して下から一段一段編み上げていく技術である。

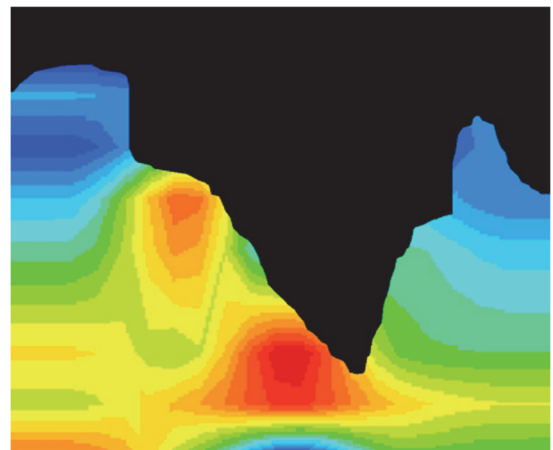


Fig.3-1 Muography image of Asamayama obtained by Hiroyuki Tanaka, 2007¹⁾.

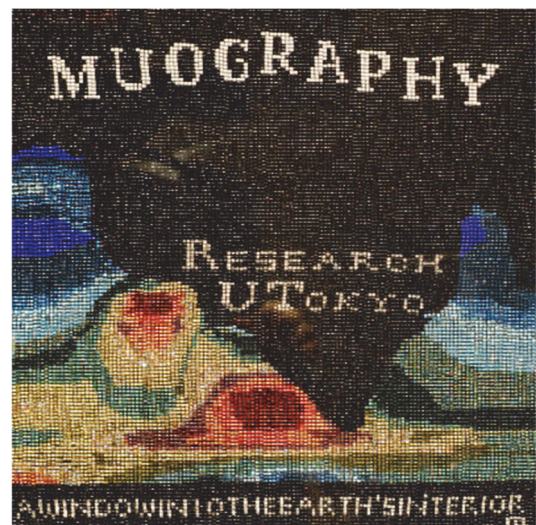
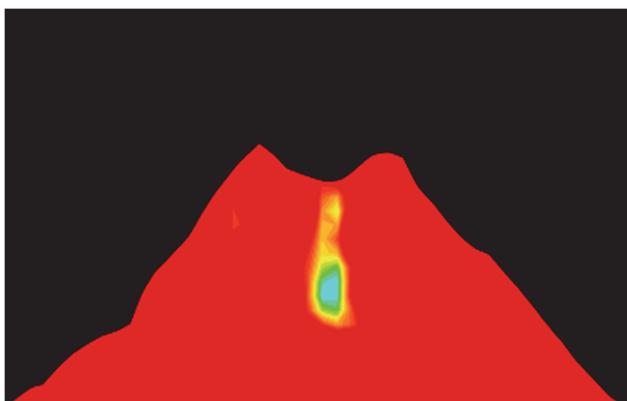


Fig.3-2 Delica beads image (H30.5cm x W23cm) of Asamayama muography prepared by Eiko Tanimura, 2021¹⁷⁾.

続いて薩摩硫黄島²⁾、昭和新山³⁾、桜島⁴⁾などの透視データが得られてきた。Fig.4-1には、田中宏幸らによる薩摩硫黄島のミュオグラフィによる計測結果²⁾を示す。マグマが世界で初めて撮影できた画像である。中島裕司はこれをアクリル彩画で表現した。Fig.4-2には、その絵画を示す。本来は見るできないミュオンがあらゆる方向から飛び交っている様子が表現されており、ダイナミックで力強い油絵である。



Fi.4-1 Muography image of Satsuma-ijima obtained by Hiroyuki Tanaka, 2008²⁾.



Fig.4-2 Oil painting F30 "Muons and volcano" prepared by Hiroshi Nakajima, 2019. (個人所蔵)

Fig.5-1 には、昭和新山のミュオグラフィ透視画像を示す³⁾。ここでは、火道が捕らえられている。久本茉莉は、それを再帰反射材とビーガンレザーを使ってアート表現した¹⁶⁾。Fig.5-2 にはフラッシュ撮影前の作品の写真、Fig.5-3 にはフラッシュ撮影後の同じ作品の写真を示す。この2つの写真の比較から、フラッシュ撮影するとミュオンと山が光る仕組みになっていることがわかる。

ところで、空気の密度コントラストは、固体物質ではないことから、ミュオグラフィのターゲットとはされてこなかった。ところが、2021年に太平洋鹿兒島沖

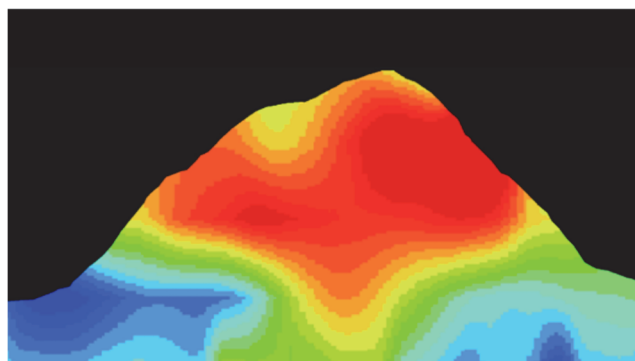


Fig.5-1 Muography image of Showa-shinzan obtained by Hiroyuki Tanaka, 2008³⁾.



Fig.5-2 Beagan leather image (H45cm x W58cm) of Showa-shinzan muography prepared by Maki Hisamoto, 2020 before flash photography¹⁶⁾.



Fig.5-3 Beagan leather image (H45cm x W58cm) of Showa-shinzan muography prepared by Maki Hisamoto, 2020 after flash photography¹⁶⁾.

を北上する台風をミュグラフィでとらえることができた⁶⁾。Fig.6-1にその結果を示す。これによると、台風を縦切りにした密度プロファイルで緑から赤にかけて密度が低下することがわかった。吉野由佳理は、

Fig.6-2に示すようにこの成功に感動してアクリル彩画で上空から見た台風を描いた¹⁸⁾。

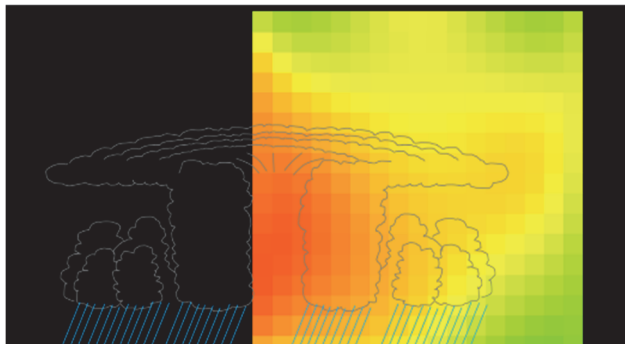


Fig.6-1 Muography image of Typhoon obtained by Hiroyuki Tanaka, 2021⁶⁾.

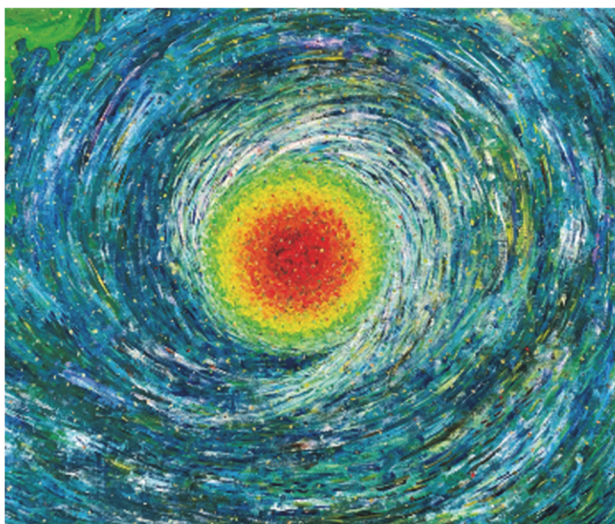


Fig.6-2 Acrylic painting (F10) "Typhoon" prepared by Yukari Yoshino, 2021¹⁸⁾.

László Oláh らは、2018年11月から2021年4月にかけて桜島のミュオグラフィ透視実験した結果を発表した⁴⁾。そこで、郷原啓二らは、この4年間にわたるマグマの動きをコンピュータグラフィック(CG)で表現した。Fig.7には、そのCGの一コマの結果を示す²⁷⁾。これは、一般人にもわかりやすい映像表現である。

3-4 ミュオンによる測位技術とアート

いわゆるGPS技術は、現在多くの分野で人間社会になくなくてはならない技術となっている。しかし、地下、屋内、海底などの環境下では利用できない。この欠点を克服しようとしたのがミュオンを用いた測位技術で、muPS (Muometric Positioning System) と呼ばれている⁸⁾。Fig.8-1には、その概念図を示す。そこで、

Fig.8-2には、それを書で表現した角谷華仙の作品¹⁷⁾を示す。また、Fig.8-3には伝統芸術である京鹿の子絞りで表現した松田美津雄の作品を示す¹⁸⁾。この測位技術が一般に活用されるようになるとGPSの利用が困難な上記のような環境下でも位置決めが可能となり、近い将来一般に活用されると期待される。

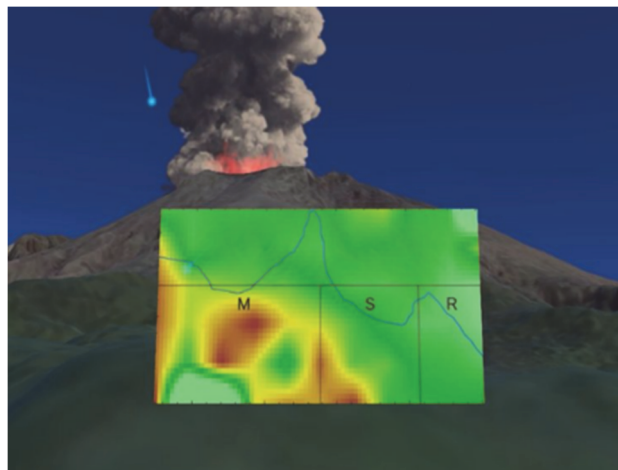


Fig.7 A computer graphic (CG) scene of the Sakurajima eruption prepared by Keiji Gohara²⁷⁾.

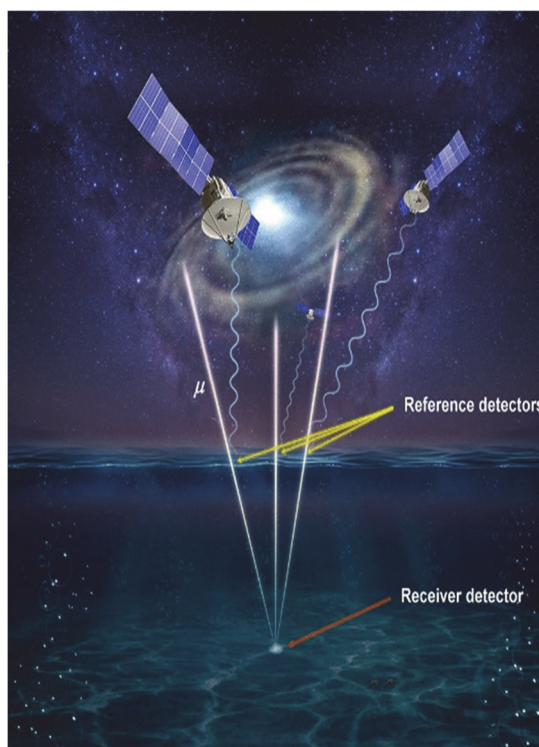


Fig.8-1 Conceptual diagram of muPS (Muometric Positioning System) obtained by Hiroyuki Tanaka⁸⁾.

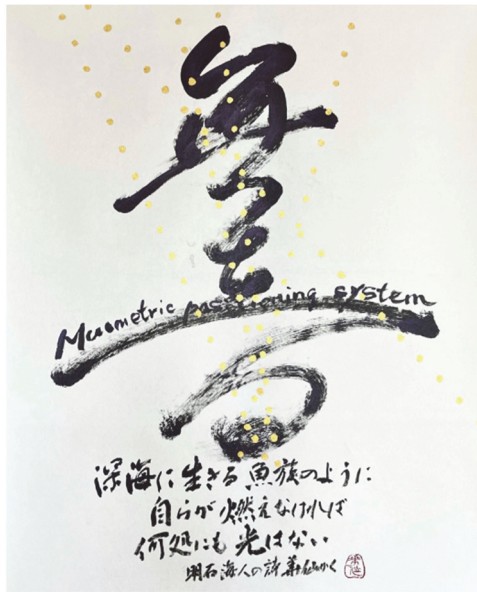


Fig.8-2 Calligraphy (H70cm x W60cm) of “Muon in sky and sea” prepared by Kasen Sumiya, 2021¹⁷⁾.



Fig.8-3 Kyokanoko-shibori (H200cm x W100cm) “Kaiju” prepared by Mitsuo Matsuda, 2022¹⁸⁾.

3-5 ミュオンによる時刻同期技術とアート

田中宏幸は、2021年にミュオンなどの高エネルギー一時粒子が生成する Extended Air Shower (EAS と略す)に含まれる多重ミュオン粒子の時空間構造並びに Oven Controlled Crystal Oscillator (OCXO と略す)の時間特性を分析することにより、空間的に離れた時計をワイヤレスかつ、100 ns を切る精度で時刻同期させることが可能であることを世界で初めて示した¹⁰⁾。Fig. 9-1 にその概念図を示す。このような多重ミュオン

粒子は地球上至るところで常時生成されているため、同時刻同期手法は世界中で実施可能である。また、高エネルギー1次宇宙線が生成するミュオンは、強い透過性を持つことから、屋内、地下、水中環境でも屋外とほぼ同等な高精度な時刻同期が世界中で可能となる。更に、高エネルギーEASに含まれる多重ミュオン粒子の時空間構造は地球大気の密度分布が極端に大きく変化しない限り、大きくは変わらないので、ほぼ同精度の時刻同期精度を何百万年にも渡って実現することが期待できる。将来、本方式を広範囲に展開することにより、GPS/GNSS に頼らない高精度な時刻同期が可能となる。

Fig. 9-2 に示した Sara Steigerwald のデジタル作品では、人間の日時計からインスピレーションを得て、架空の物体「ミュオンダイアル」が描かれている¹⁸⁾。人間の日時計は、太陽の位置が変化するさまざまな時間に立っている人間のシルエット（イラストでは黄色のアウトラインで表示）を地面に描くことで作成できる。次に、マーカーを使用して時間を定義できる。このイラストでは、ミュオンを表すために青緑色を使用した。「ミュオンダイアル」には24時間表示の文字盤が示されている。この作品では、青緑色の枠で囲まれたボックスは真夜中を表し、円の周りの白と黒のボックスはその他の時間を表す。これは、日時計とは異なり、Cosmic Time Synchronization (CTS と略す)がいつでも機能するためである。中央の人物「ミュオンマン」で示すミュオンは大気中に入り、目に見えない形で人体のさまざまな方向に降りかかる。CTSは、広い意味では、宇宙粒子を使用して時間パターンを利用した技術である。このパターンを識別して、非常に小さな時間増分を定義する。この図ではCTSのすべての機能を示しているわけではないが、「ミュオンダイアル」という新しい概念を表現した。日時計と同様に、CTSが地球外物体すなわち宇宙線起源のミュオンを利用して時間を測定していることを強調したい。

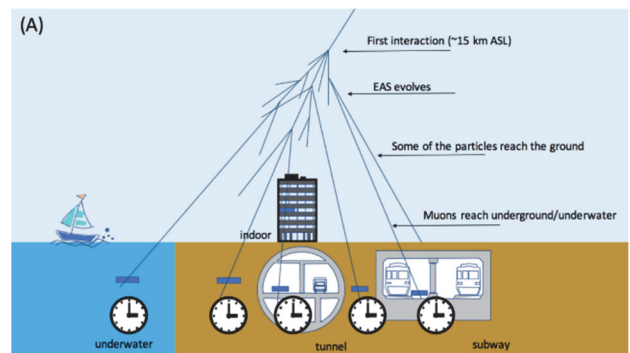


Fig.9-1 Conceptual diagram of time synchronization Technology obtained by Hiroyuki Tanaka, 2022¹⁰⁾.



Fig.9-2 Digital art “24-hour sundial of Muon dial”prepared by Sara Steigerwald, 2023¹⁸⁾.

3-6 ミュオンの通信技術への応用とアート

田中宏幸は、2023年1月にミュオンによるワイヤレスセキュリティ技術—暗号鍵を送受信者間で一切やりとりしない超高セキュリティワイヤレス通信技術の開発に成功したと報じた¹¹⁾。Fig. 10-1にその概念図を示す。送信者はミュオンを検出することで、その検出時刻を暗号鍵として文書をエンコードする。一方、受信者は同一のミュオンを別の場所で検出することでその検出時刻を保存する。受信者は送受信者間の距離からミュオンの飛行時間を正確に計算することができるので、暗号鍵の物理的なやりとりなく、文書をデコードすることができる。すなわちミュオンを利用したこの技術 Cosmic Coding and Transfer (COSMOCATと呼ぶ)は、超高精度のセキュリティのパスワードとして利用できる。ミュオンの速度は屋内、屋外、地上、地下問わず同じ速度が担保されているので、地球上いかなるところでも COMOCAT を実施することが可能である。

植村友哉は、Fig.10-2に示すように羽をひらひらと舞うデータに見立て、1本の線をミュオンとしてアクリル彩画で表現した¹⁹⁾。彼は、近い将来ミュオンを利用した超高セキュリティワイヤレス通信を夢見ている。

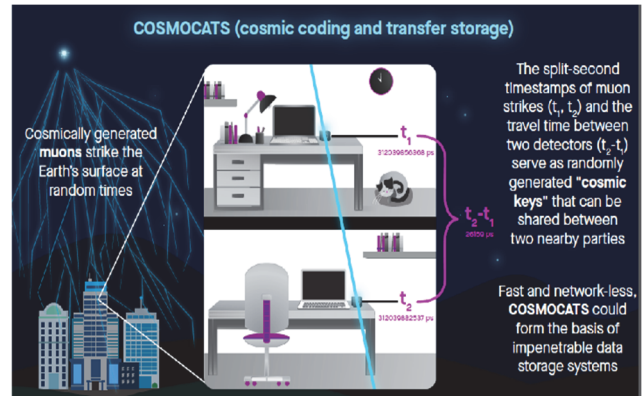


Fig.10-1 Cosmic Coding and Transfer (COSMOCAT) for Ultra High Security Near Field Communications obtained by Hiroyuki Tanaka, 2023¹¹⁾.



Fig.10-2 Acrylic painting of COSMOCAT prepared by Tomoya Uemura, 2023¹⁹⁾.

4. 市民活動

4-1 ミュオグラフィアートの展覧会

難解な最先端科学を専門的な知識を持たない一般人にでも理解可能な活動を2017年から市民とともにやってきた。その活動の代表例が展覧会である。展覧会は、このプロジェクトが2017年4月に発足して以来、2024年8月までに19回開催した。新しいアート作品は、150点にも及ぶ。Fig.11には、2023年の展覧会の実施例を示す。また、各展覧会では、ミュオグラフィアート集を発行し、多くのアート作品を記録に残した^{14~19,26,28)}。最も多く開催した場所は、大阪駅に隣接する商業施設であるグランフロント大阪ナレッジキャピタルである。その他、関西大学博物館(大阪)、今城塚古代博物館(大阪)、多摩美術大学美術館²⁸⁾(東京)、駐日ハンガリー大使館のリスト・ハンガリー文化センター(東京)、JST主催のサイエンスアゴラ(東京)、国際美術研究所(岡山)等々である。



Fig.11 Civic Activities: An example of Muography Art Exhibition, 2023.

4-2 高校生のリベラルアーツ

2023年には、早稲田大学田中香津生主宰の加速キッチン合同会社³³⁾による高校生を対象とした宇宙線学の教育活動との連携を開始した。同社が企画した「高校生によるミュオグラフィ測定装置を活用した宇宙線フラックス変動解析」チームに造山古墳の計測データを提供した。これを元に研究を行った高校生（帝京大学可児高等学校サイエンス部杉本幸太郎、メンター山形大学理学部メンター赤尾亮伍が東海学院大学の発表会で奨励賞を受賞した(2023.12.9)。

一方、角谷賢二（著者）は、岡山国際塾主催の「こくさいこどもフォーラム岡山」で40名の高校生を対象にミュオグラフィの講義を行った(2020.8.2)。このフォーラムでは、1995年創立以来25年間にわたり主として岡山県内の青少年を対象に国際的理解の学習推進のボランティア活動を行っている。コロナ渦でありZoom講義であったが、後日の高校生のレポート（参考文献29の4項）を読むと関心の深さが感じられる²⁹⁾。



Fig.12 Sumiya's lecture for high school students on web, 2020²⁹⁾.

4-3 小中学生のミュオグラフィリベラルアーツ

グランフロント大阪のナレッジキャピタルの主催するワークショップに参加してミュオンならびにミュオグラフィの勉強会を開催してきた²⁹⁾（参考文献29の7項）。対象は小中学生で、ミュオンとかミュオグラフィの話を分かりやすく行い、実際にその話から生まれたインスピレーションを絵画にしてもらった。話を聞くだけでなく、体を動かして絵を描くことは極めて効果的であった。この活動は、子供たちに幼少のころからサイエンスに興味を抱いてもらいたいと願っての活動である。

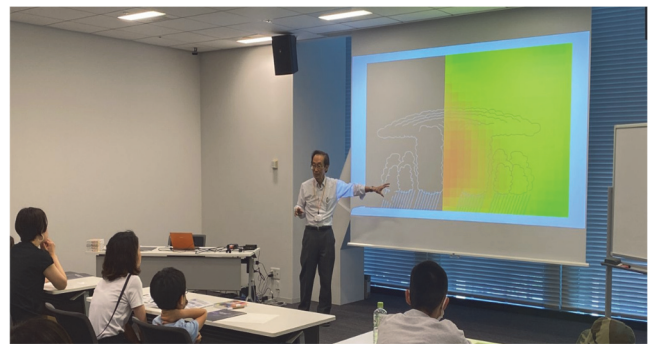


Fig.13 Sumiya's and Yoshino's lecture on muography and art to elementary and junior high school students, 2023.

さらに、ミュオグラフィアートの展示会には、2023年と2024年には、アトリエ HIRO 絵画教室の小学生がそれぞれ年度で約 50 名が参加した。純粋な子供たちのすばらしい発想には驚くことが多かった。

4-4 市民とともに

2023年には、田中宏幸とカナダのサンダーバードで有名な人形劇制作チームのリー夫妻は、共同でミュオメトリーmuPSを題材とした「ミックシ」という人形劇を制作した^{30,31)}。Fig.14には、人形劇の制作風景を示す。完成後、ホームページ、YouTubeなどで公開されている。我々は、2023年5月グランフロント大阪のアクティブスタジオでこの作品の上映会を開催した。一般市民、子供など多くの方が参加し、感動を得た。



Fig.14 Miikshi production site by Mr. and Mrs. Lee^{30,31)}.

ところで、古墳の内部には、考古学者に限らず多くの市民に関心が寄せられている。そこで、地元自治体や地元市民と共同で、2019年より大阪府高槻市の今城塚古墳、2021年からは岡山の造山古墳においてミュオグラフィ透視実験を行ってきた。今城塚古墳では、古墳フェス「はにコット」に参加し、多くの参加者の前で我々研究者の挨拶とミュオグラフィ装置の見学会を行った。

岡山市の造山古墳関係では、岡山大学のシンポジウム²²⁾や岡山市高松公民館での講演会などでミュオグラフィの成果物を公開した。Fig.15には、その後者の講演会(造山古墳蘇生会主催)の様子を示す。関係機関の研究者、一般市民の参加に加えて、地元大学の学生たちの参加もあり、盛り上がった。

さらには、ミュオグラフィとそのアートの市民への公開としては、2021年のハンガリー大使館の文化センター(東京)での展示会があげられる³²⁾。Fig.16にその様子を示す。なお、ハンガリーのウイグナー物理学研究センターではミュオグラフィの研究が進んでおり、駐日ハンガリー大使館が我々の研究と活動を応援している。

以上のように一般市民、大使館関係者、自治体関係

者らとともにミュオグラフィのアウトリーチ活動を展開した。



Fig.15 A lecture for the general public on Muography, 2024.



Fig.16 Exhibition of muography art at List Hungarian Cultural Institute, 2021³²⁾.

5. 結言

本プロジェクトでの活動をまとめると、次のようになる。

- (1) 子供から老人までの一般人にミュオグラフィを正しく理解してもらうための展示会を活用したアート活動を推進した。
- (2) 高校生による解析を主体にしたリベラルアーツ活動を推進した。
- (3) 市民、自治体との共同による古墳の解析を通じた社会連携活動を推進した。

我々は、このような活動を開始した時にはミュオグラフィを知っている人は1%にも満たなかったが、活動を通じて先端科学であるミュオグラフィを理解できた一般人が60%から70%と多くなった。また、本活動を刺激として夢のある科学の世界に進んでいきたいと考える若い世代が発生しつつある。

さらには、このようなアウトリーチ活動が今後様々な分野の研究、教育、地域振興に貢献できることを願

っている。

謝辞

アウトリーチ活動においては、一般の方々からご寄付いただいた東京大学基金「ミュオグラフィリベラルアーツ基金」の一部を活用した。また、古墳の計測には JSPS 科研費（課題番号 21K12589）の助成を受けた。ここに感謝申し上げる。

参考文献

- 1) Hiroyuki K.M. Tanaka et al. : “High resolution imaging in the inhomogeneous crust with cosmic-ray muon radiography: The density structure below the volcanic crater floor of Mt.Asama, Japan” Earth Planet. Sci. Lett., 263.104-113(2007).
- 2) Hiroyuki K.M. Tanaka et al. : “Cosmic-ray muon imaging of magma in a conduit: Degassing process of Satuma-Iwojima Volcano” Japan, Geophys. Rs. Lett., 36, L01304(2006).
- 3) Hiroyuki K.M. Tanaka et al. : GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 34, L22311, “Imaging the conduit size of the dome with cosmic-ray muons:The structure beneath Showa-Shinzan Lava Dome, Japan” DOI: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2007GL031389>
- 4) László Oláh et al.: AGU Geophysical Research Letters ” Muon Imaging of Volcanic Conduit Explains Link Between Eruption Frequency and Ground Deformation” (Sakura-jima, 2023). <https://doi.org/10.1029/2022GL101170>
- 5) László Oláh et al.: BOOK “Muography-Exploring Earth’s Subsurface with Elementary Particles-“ - (WILEY 2022). DOI: https://eos.org/editors-vox/high-definition-imaging-of-the-subsurface-with-cosmic-ray-muons?fbclid=IwAR2J39YQUsTuxGfDjix0xGZbNOMwqhA7v4Czt8lBsd504FicoBG_N7R5u3s
- 6) Hiroyuki K.M. Tanaka et al. :” Atmospheric muography for imaging and monitoring tropic cyclones” DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20039-4>
- 7) Hiroyuki K.M. Tanaka et al. :” First results of undersea muography with the Tokyo-Bay Seafloor Hyper-Kilometric Submarine Deep Detector” (nature: scientific reports 11, Article number: 19485 (2021). DOI: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-98559-8#Abs1>
- 8) Hiroyuki K.M. Tanaka: “Muometric positioning system (μ PS) with cosmic muons as a new underwater and underground positioning technique” (2020). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75843-7>
- 9) Hiroyuki K.M. Tanaka et al.: “First navigation with wireless muometric navigation system (MuWNS) in indoor and underground environments”(2023). DOI:<https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107000>
- 10) Hiroyuki K.M. Tanaka : Cosmic time synchronizer (CTS) for wireless and precise time synchronization using extended air showers. Sci Rep 12, 7078 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11104-z>
- 11) Hiroyuki K.M. Tanaka : COSMOCAT, “Cosmic coding and transfer for ultra high security near-field communications” (2022). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105897>
- 12) Hiroyuki K.M. Tanaka et al. : “Muography” (nature reviews 2023). DOI: <https://www.nature.com/articles/s43586-023-00270-7>
- 13) 関西大学ミュオグラフィアートプロジェクトのホームページ “MUOGRAPHY ART PROJECT” : <https://wps.itc.kansai-u.ac.jp/ku-map/>
- 14) ミュオグラフィアート集 : 宇宙からの贈り物、(関西大学ミュオグラフィアートプロジェクト発行)、pp.1-29 (2018).
- 15) Hiroshi Nakajima, Kenji Sumiya: ミュオグラフィアート集 (関西大学ミュオグラフィアートプロジェクト発行)、GIFT FROM OUTER SPACE II, (International Art Institute), pp.5-51 (2019).
- 16) 角谷賢二、中島裕司 : ミュオグラフィアート集 MUOGRAPHY ART 2020 (関西大学ミュオグラフィアートプロジェクト発行)、pp.6-51 (2020).
- 17) 角谷賢二、中島裕司 : ミュオグラフィアート集 MUOGRAPHY ART 2021 (関西大学ミュオグラフィアートプロジェクト、東京大学ミュオグラフィリベラルアーツプロジェクト共発行)、pp.6-51 (2021) .
- 18) 角谷賢二、中島裕司 : ミュオグラフィアート集 MUOGRAPHY ART 2023 (関西大学ミュオグラフィアートプロジェクト、東京大学ミュオグラフィリベラルアーツプロジェクト共発行)、pp.7-63 (2023) .
- 19) 角谷賢二、中島裕司 : ミュオグラフィアート集 MUOGRAPHY ART 2024 (東京大学ミュオグラフィリベラルアーツプロジェクト、国際美術研究所、関西大学ミュオグラフィアートプロジェクト共発行)、pp.7-68 (2024).

- 20) 上記の各ミュオグラフィアート集デジタル版：
<https://wps.itc.kansai-u.ac.jp/kumuog/2021/07/15/ミュオグラフィアート冊子/>
- 21) Hiroyuki K.M. Tanaka et al. : EGU “Muography as a new tool to study the historic earthquakes recorded in ancient burial mounds” (2020).
<https://doi.org/10.5194/gi-9-357-2020>
- 22) 角谷賢二他：岡山大学シンポジウム資料集 文理融合分析による造山古墳の総合的研究「ミュオグラフィの最近の動向と造山古墳への応用」、pp.13-22 (2023.06.04).
- 23) 林武文, 角谷賢二：“ミュオグラフィを用いた古墳の内部調査 —高槻市今城塚古墳透視実験—”, 電気学会 電子・情報・システム部門 知覚情報研究会資料, PI-20-055, pp.33-37 (2020).
- 24) 稲葉望他：“ミュオグラフィによる古墳の内部調査に関する研究 —ミュオンの透過シミュレーションと計測結果の比較—”, 電気学会 電子・情報・システム部門大会, TC4-2, pp.128-133 (2021).
- 25) 林武文他：“ミュオグラフィを用いた古墳の内部調査 —未発掘の大型前方後円墳を対象とした透視実験—”, 電気学会 電子・情報・システム部門大会, TC17-6, pp.626-630 (2023).
- 26) ミュオグラフィアートプロジェクト発行の本：“Muography or Visualism in the 21st Century”, p36 (2017).
- 27) 関西大学ミュオグラフィアートプロジェクトホームページの桜島ミュオグラフィのコンピュータグラフィック (2023) : .
https://wps.itc.kansai-u.ac.jp/ku-map/?p=5137&doing_wp_cron=1720870861.4514520168304443359375
- 28) 淵田雄、関川歩：多摩美術大学美術館発行の本「宇宙に訊ねよ」(2019).
- 29) 関西大学ミュオグラフィアートプロジェクトのホームページのSDG s のページ：
https://wps.itc.kansai-u.ac.jp/ku-map/?p=2915&doing_wp_cron=1720912804.5318279266357421875000
- 30) 東京大学ホームページのミックシ人形劇：
<https://news.muographix.u-tokyo.ac.jp/2023/05/15/filmmakers-interview-justin-t-lee-and-lindsay-lee/news-local/>
- 31) 関西大学ホームページのミックシ人形劇：
https://wps.itc.kansai-u.ac.jp/ku-map/?p=4970&doing_wp_cron=1720922073.6755731105804443359375
- 32) 関西大学ミュオグラフィアートプロジェクトのホームページの駐日ハンガリー大使館、ハンガリー文化センターでの展覧会：
https://wps.itc.kansai-u.ac.jp/ku-map/?p=3574&doing_wp_cron=1720936878.9960629940032958984375
- 33) 中高生の宇宙・素粒子探求の「加速キッチン」のホームページ：
<https://accel-kitchen.com/>